河川堤防のパイピング危険度の簡易点検フローと被災事例による妥当性 Simplified check flow of piping risk of river levees and validity by case of disaster

高辻理人¹,前田健一²,西村柾哉³,牧洋平⁴,泉典洋⁵,古溝幸永⁶

- 1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address 30415059@stn.nitech.ac.jp
- 2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター
- 3 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻
- 4 名古屋工業大学・都市社会工学科
- 5 北海道大学教授・環境フィールド工学専攻
- 6 北海道開発局

概 要

河川堤防について,堤体強度が高く,基礎地盤が透水層の上に低透水層が被覆した複層構造の場合パイピングの危険度が高いことが定性的に明らかになってきた。今後はこれらの情報から実際の現場に適用可能な指標を作成する必要がある。また,パイピングが進展する現象であることから,水防活動の効果が十分に発揮されるような基礎地盤条件,活動のタイミングや規模などを示すことも不可欠である。そこで,本稿では三次元飽和・不飽和浸透 FEM 解析より,複層構造基礎地盤の被覆土層厚・透水係数比,行き止まり境界までの距離,堤外地への透水層の露出の有無,堤内の不陸(高低差)といった項目がパイピング破壊に及ぼす影響について G/W などに着目して検討した。また,漏水対策型の水防工法を模擬した簡易実験からその効果を考察した。さらに,解析と模型実験による結果からパイピングの危険度を判定する簡易点検フローを作成し,実堤防の被災事例を基にフローの妥当性を検討した。

キーワード:河川堤防,パイピング,噴砂

1. はじめに

近年,河川水が透水性基礎地盤に浸透することで,堤内 において漏水や噴砂が発生する被災事例が増加している。 また,平成24年に矢部川堤防が決壊した事例のように, 高水位の外力が長時間作用することで堤内側の漏水や噴 砂の発生・継続を助長し,パイピング破壊に至る危険性が ある。そこで,パイピングの進展によって河川堤防が損傷・ 決壊する危険性の高い水理一地盤の総合的な条件を力学 的に把握する必要があり,それに基づく重点監視箇所を抽 出するための重要指標を見出すことは今後の河川管理に は不可欠な課題である。

既往の模型実験から河川堤防のパイピングメカニズム は堤体—基礎地盤の地盤特性により大きく異なり,特に堤 体の強度が高く,透水層の上に低透水層が被覆している複 層構造基礎地盤を有する場合,パイピング破壊の危険度が 高いことが明らかになった¹⁾²⁾。今後はこれらの情報をも とにパイピングに対する危険な基礎地盤構造をさらに細 かく検討し,実際の現場に適用可能な評価指標を作成する 必要がある。

また、パイピングに対する伝統的な水防工法として釜

段・月の輪工法といった漏水対策型水防工法が用いられて おり(図1参照),これらは経済性や柔軟性に優れている ため将来的にも継承・強化すべき手段である。しかし,そ の効果性能についての検討事例は少なく²⁾³⁾,パイピング が進展する現象であることから水防活動の効果が十分に 発揮されるような水理―堤防構造条件,活動のタイミング や規模などを示すことも不可欠である。

そこで本稿では三次元飽和・不飽和浸透 FEM 解析を実施し,模型実験では検討が難しい複層構造基礎地盤の被覆 土層厚・透水係数比,法尻から行き止まり境界までの距離, 堤外地の透水性下層の露出の有無,堤内地の不陸(高低差) といった項目がパイピング破壊に及ぼす影響について



図 1 現地の様子(水防工法)

G/Wや基礎地盤内の圧力水頭,浸透流速に着目して検討した。また,模型実験により基礎地盤の締固め度が噴砂発生やパイピングの進展に及ぼす影響を検討した。

さらに, 釜段・月の輪工法といった漏水対策型水防工法 を模擬した模型実験を実施し, その効果について検討した 上で,対策工の効果的な対策方法を提案した。

そして,上記の検討結果を踏まえて,三次元飽和・不飽 和浸透 FEM 解析と模型実験による結果を整理し,パイピ ング破壊の危険度を判定する簡易点検フローを作成した 上で,実堤防の被災事例から点検ポイントの妥当性を評価 した。

2. 解析・実験概要

2.1 解析概要

図 2 に基本となる解析モデルの概要図を示す。堤体は 粘土を使用し基礎地盤は上層低透水層・下層透水層の複層 で作成した。堤内側の基礎地盤の右端(図 2 参照)は浸透 流が浸出しないよう設定し、いわゆる行き止まり境界にな っている。また、透水層が河床へ露出している場合の影響 を調べるため河川水が下層に直接流入するよう堤外に 20mm の露出部を設置したモデルも作成した。

外力条件は堤外に地表面から 60mm の水位を一様に作 用させ平均動水勾配 *i*=0.20 で定常解析を実施した。外力条 件を平均動水勾配 *i*=0.20 に設定したことには二つの理由 がある。一つ目は解析モデルと同様のスケールの模型を用 いて実験を行い,基礎地盤内の間隙水圧分布を模型実験と 解析で比較した結果,模型実験で噴砂が発生し始める平均 動水勾配 *i*=0.20 までは高い精度で解析結果が適応可能で あることが確認されているためである²⁾。二つ目は国総研 HP で公開されている全国の河川堤防断面データ⁴⁾より, 矢部川, 庄内川, 千歳川の三河川の左右岸について HWL 時の河川水位と裏法尻を結び簡易的に平均動水勾配を求 めた結果,値は概ね*i*=0.20 以下に収まっており平均動水勾 配 *i*=0.20 が国の管理する一級河川に作用する最大級の外 力であると考えたためである。

また、材料の透水係数は模型実験と比較するため粘土 $k=3.00 \times 10^{-8}$ (m/s)、低透水層 $k=1.40 \times 10^{-5}$ (m/s)、透水層



図 2 解析モデル(実験模型)の概要図

k=1.80×10⁻³(m/s)に設定した。

3. 解析・実験結果および考察

3.1 複層基礎地盤の層厚の影響

上層下層それぞれの鉛直方向層厚がパイピング破壊に 及ぼす影響を定量的に検討するため,上層厚下層厚をそれ ぞれ変化させた場合の噴砂発生危険度 *G/W* を比較した。

G/Wは一般的に盤膨れの指標として用いられるが, 噴砂 は浸透水圧が上載荷重を超えて地表面に噴出する現象で あり, 被覆土層重量と基礎地盤内の揚圧力の比(G/W)か ら危険度を推定できることが既往研究で明らかになって いる¹⁾。そこで,本稿ではG/Wを噴砂発生危険度と定義し 検討を行う。解析条件の一覧は表1に示す。解析モデルは

表 1 解析条件一覧 (層厚)

上層厚Lu	下層厚Ll	下層の河床	ケーフ米		
(mm)	(mm)	への露出	クース数		
20	10	あり			
30	20	なし			
45	30				
70	45				
	70				
4通り	5通り	2通り	$4 \times 5 \times 2 = 40$		



(a) 上図;下層の露出なし
 (b) 下図;下層の露出あり
 図 3 透水層厚 L_l と G/Wの関係(*i=0.2, d=200mm*)

図 2を基本とし基礎地盤の上層厚,下層厚,下層の河床への露出の有無をそれぞれ変化させ,表 1 に示す全ての組み合わせ全 40 通りについて解析を実施した。ただし全ケース裏法尻から行き止まり境界までの距離は *d*=200mm で固定した。

図 3 に各ケースの *G/W* と下層厚の関係を示す。低透水 層の土粒子の比重を *G*₅=2.65,間隙比を *e*=0.90,水の重量 を yw=1.0t/m³ とし,被覆土層重量は式(1)のように求めた。

$$G = \gamma' L_u = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w L_u \approx 0.86 L_u \tag{1}$$

G:被覆土層重量 γ':水中単位体積重量 Lu:上層厚 揚圧力 W は裏法尻直下の上層と下層の層境(図 2;間隙 水圧計側地点)における飽和状態(河川水位 0mm)からの 過剰間隙水圧の圧力水頭に水の重量 yw=1.0t/m3を掛けた値 として算出した。図 3 より上層が薄く,下層が厚いほど G/Wが小さくなっていることが分かる。また、 グラフの波 形は上層厚,下層の露出の有無に関わらずいずれも下層厚 が 50mm 程度あれば G/W は一定値に収束していることが 確認できる。よって、法尻の G/W に影響を及ぼす下層の 鉛直方向の厚さは、上層厚及び下層の露出の有無に関わら ず 50mm 程度であると考えられる。また、上層厚が 70mm のケースではいずれの条件でも G/W が1以下にならず, 上層厚が一定以上の厚さであれば噴砂発生の危険性は低 いと考えられる。ここで噴砂発生の境界となる上層厚 Luc について考える。揚圧力 W は外水位 Δh が地盤内に伝播し て発生するものであり, 揚圧力が外水位以上になることは ない。また,外水位 Δh は平均動水勾配(i=Δh/B)より Δh= iB と表すことができる。よって上層厚 L_{uc} は $G \ge W$ の釣り 合い式より式(2)と表せる。

$$L_{uc} = \frac{\gamma_w \Delta h}{\gamma'} = \frac{\gamma_w i B}{\gamma'}$$
(2)

本解析条件の場合 *Luc*=69mm となり解析結果と一致している。

以上よりパイピングに影響を及ぼす基礎地盤の鉛直方 向の範囲は上層厚が最大 70mm,下層厚も最大 50mm 程度 であり合わせて最大で約 120mm の深度までが影響範囲と 推定できる。これを堤体幅 300mm で除し無次元化すると 堤体幅の約 0.4 倍の深度までが影響範囲になる。

3.2 複層基礎地盤の透水係数比の影響

危険とされる複層基礎地盤の透水層及び低透水層の透水係数について、これまで定量的に検討されていなかった。 そこで、基礎地盤の透水係数を変化させ、各条件における G/W 及び裏法尻の局所動水勾配を算出することで噴砂の 発生危険度を評価した。解析条件の一覧は表 2 に示す。解 析モデルは図 2 を基本とし上層の透水係数 ku と、上層の 透水係数 ku に対する下層の透水係数 ku の比率(k/ku)をそれ ぞれ変化させ表 2 に示す全ての組み合わせ全 18 通りにつ いて解析を実施した。なお、透水係数比 k/ku が 1 のケース は上層と下層の透水係数は等しく単一基礎地盤となり、透 水係数比 k/ku が 0.1 のケースは下層の透水係数が上層の透 水係数よりも低く透水層と低透水層が逆転した複層基礎

表 2 解析条件の一覧 (透水係数)

上層の透水係数k _u (m/s)	透水係数比 k _l /k _u	ケース数
1.0×10^{-4}	0.1	
1.0×10^{-5}	1	
1.0×10^{-6}	10	
	100	
	1000	
	10000	
3通り	6通り	3×6=18



図 4 透水係数比 k/kuと G/Wの関係 (i=0.2, d=200mm, Lu=45mm, L=45mm, 露出なし)



図 5 透水係数比 k/kuと局所動水配の関係 (i=0.2, d=200mm, Lu=45mm, L=45mm, 露出なし)

地盤のモデルになる。また,基礎地盤は上層厚をL₄=45mm, 下層厚を L_F=45mm, 行き止まり境界までの距離を d=200mm に固定し,下層の露出部は設置していないモデ ルについて検討した。

図4に各ケースのG/Wと透水係数比の関係を示す。ただしG/Wは透水層の上に低透水層が被覆した複層構造の場合に適用可能な値であるため透水係数比k/kuが0.1と1のケースは除外した。図5に各ケースの裏法尻(図2;流速計側地点)の流速vを上層の透水係数kuで除して求めた見かけの局所動水勾配v/kuと透水係数比の関係を示す。

図 4 より透水係数比が大きくなるほど G/W が小さくな り危険度が増加しているが,透水係数比が 100 を超えると G/W はほぼ一定値に収束している。透水係数比が 10 と 100 のケースを比較すると G/W は 1.76 倍異なることから透水 係数比が噴砂発生危険度を評価する際の重要な指標であ り, 100 が着目すべき閾値であると考える。

図 5 より透水係数比が大きくなるほど上層の見かけの 局所動水勾配 v/ku は大きくなり,透水係数比が 100 付近で 局所動水勾配は約 1.0 に収束している。局所動水勾配が大 きくなると上層の有効応力は低下し液状化状態に近づく ため地盤の耐力は低下する。透水係数比が 6,100 程度で v/ku がそれぞれ 0.5,0.9 であるので,基礎地盤の表層の支 持力は単純に 50,10%まで低下する。実際に著者らの模型 実験でも,透水係数比が約 100 の場合に裏法尻の基礎地盤 が液状化している様子を確認している。地盤が液状化状態 になることで噴砂の発生を助長している可能性があり,土 の流動性の観点からも透水係数比が重要な指標であり, 100 以上ではかなり危険な条件と言える。

G/W と局所動水勾配は透水係数の絶対値ではなく透水 係数の比によって支配される。また、上層の透水係数が同 じ条件で下層の透水係数を大きくすると、下層での透水に よる圧力水頭の損失は小さくなり、上層での損失が支配的 になる。そのため透水係数比が100以上になると G/W、局 所動水勾配ともに一定値に収束したと考えられる。透水係 数比が圧力伝播や浸透経路の決定や破壊モードに影響を 与える重要な指標と言える。一方、透水係数の絶対値は流 速・流量に影響を与えパイピングの進展速度に関係すると 考えられる。

3.3 堤内の行き止まり境界の影響

透水性基礎地盤が堤内地で行き止まりになっているい わゆる行き止まり境界の存在が漏水・噴砂を助長する要因 の一つとして挙げられる。そこで,裏法尻から行き止まり 境界までの距離 d を変えたときの基礎地盤の圧力水頭の 変化を比較し,行き止まり境界までの距離が基礎地盤の圧 力伝播に与える影響を検討した。解析条件の一覧を表 3に 示す。解析モデルは図 2 を基本とし裏法尻から行き止ま り境界までの距離 dを5 通りに変化させた。さらに下層の 河床への露出の有無も変化させた。また基礎地盤の影響範 囲内で検討を行うため全層厚は 90mm に固定したうえで 上層厚を変化させ,表 3 に示す全ての組み合わせ全 40 通 りについて解析を実施した。

図 6 に各ケースの行き止まり境界までの距離と過剰間 隙水圧の圧力水頭の関係を示す。横軸は裏法尻から行き止 まり境界までの距離 d を堤体幅 B=300mm で除して無次元 化した値である。縦軸は裏法尻直下の基礎地盤の上層と下 層の層境の過剰間隙水圧の圧力水頭を外水位の Δh=60mm で除し、無次元化した値である。図 6 よりいずれの基礎地 盤でも行き止まり境界までの距離が小さいほど高い圧力 が伝播していることが分かる。d/B=0.17 と d/B=3.33 のケー ス比較すると縦軸の値は 0.7 から 0.3 に変化しており、行

表 3 解析条件の一覧(行き止まり)

行き止まり境界	上層厚 L_u	下層の河床	た. フ米ケ	
までの距離 <i>d</i> (mm)	(mm)	への露出	クース数	
50	20	あり		
100	30	なし		
200	45			
400	70			
1000				
5通り	4通り	2通り	$5 \times 4 \times 2 = 40$	



(a) 上図;下層の露出なし
 (b) 下図;下層の露出あり
 図 6 行き止まり境界までの距離 d と圧力水頭の関係
 (*i*=0.2, *d*=200mm, L_u=45mm, L_i=45mm)

き止まり距離は圧力を 2 倍以上変化させる重要な評価項 目と考えられる。また,被覆土層厚,下層の露出の有無に 関わらず d/B が 1.5 以上では圧力水頭にほとんど変化が見 られず,この解析条件における行き止まり境界の影響範囲 は裏法尻から堤体幅の 1.5 倍程度の距離であると考えられ る。本稿では被覆土層厚と透水層の露出の有無は行き止ま りの影響範囲に無関係であることが分かったが,今後は堤 体幅,外力,透水係数などを変化させた場合の行き止まり の影響についても検討する。

3.4 堤内地の不陸の影響

これまで堤体を支持する基礎地盤の条件に着目して検 討を行ってきたが、基礎地盤のみではなく堤内・堤外の地 形が浸透破壊に及ぼす影響も考慮しなければならない。例 えば、漏水や噴砂などを助長する要因の一つとして堤内地 の不陸(高低差)が考えられる。そこで、解析モデルの奥 行中央の堤内側法尻地表面に縦横 10mm の正方形の低地 を作成し、高低差を変化させた場合の低地部分の

浸透流速を比較した。解析条件の一覧を表 4 に示す。解析 モデルは図 2 を基本とし全層厚は 90mm に固定した上で, 基礎地盤は単一層と複層(*Lu*=45mm, *Lr*=45mm)のケース を用いてそれぞれ高低差を 5 通り変化させた。なお,行き 止まり境界までの距離を *d*=200mm に固定し,下層の露出 部は設置していないモデルについて検討を行った。また, メッシュサイズの感度分析も実施し,メッシュサイズの影 響は十分小さいことを確認した。

図 7 に各ケースの高低差と低地部分の流速の関係を示 す。単一層は低地部分の流速が最大で平地の 1.37 倍しか 増加せず不陸の影響はほとんど受けていないが,複層は低 地の深度が 36mm で流速が平地の 3.09 倍に増加し,下層 まで達する 45mm では平地の 81.9 倍に跳ね上がっている。 よって,複層は単一層に比べて不陸の影響を強く受けると 言える。複層は透水層によって広範囲から三次元的に集水 効果を発揮するためだと考えられる。また,層構造一不陸 のように組み合わせによって影響が異なる場合があるた め,それぞれの評価項目を個別に検討するのではなく,評 価項目の組み合わせを考慮したフロー形式で安定性を検 討する必要がある。

		· ·
層構造	高低差(mm)	ケース数
単一層	9	
$(L_u = 90 \text{mm})$	18	
複層 (<i>L_u</i> =45mm <i>L_l</i> =45mm)	27	
	36	
	45	
2通り	5通り	2 × 5=10





図 7 堤内地の不陸の流速(i=0.2, d=200mm, 露出なし)

3.5 堤内の締固め効果

噴砂が発生しやすい基礎地盤構造として透水層の上に 低透水層が被覆した複層構造基礎地盤が挙げられる。これ は、下層の透水層に伝播した圧力が上層の低透水層を揚圧 し、噴砂発生を助長するためである。しかし、このような 場合,上層の強度が高ければ噴砂の発生やパイピングの進 行を抑制することができる可能性が考えられる。そこで, 模型実験により基礎地盤の相対密度を変化させることに よって,基礎地盤の締固め度が噴砂の発生やパイピング破 壊に及ぼす影響を検討した。実験模型は図 2を基本とし, 基礎地盤は水中落下法で堆積させ、上層は硅砂7号(低透 水層),下層は硅砂2号(透水層)を使用した。層厚は上 層下層それぞれ 45mm ずつである。基礎地盤の締固め度は 上層の相対密度を変化させることで管理し,下層の相対密 度は70%程度になるように締め固めた。また、堤体部分は 含水比 20%の藤森粘土をアクリル壁で囲われた箇所に入 れ締め固めた。なお、堤外側は下層の河床への露出部は設 けていない。基礎地盤の下流端は行き止まり構造となって おり、法尻からの距離は 200mm とした。ただし、基礎地 盤の相対密度の違いによるパイピングの進展を模型断面 より確認するために模型の奥行を 70mm とした。水位条件 は図 8, 各材料の粒度分布は図 9に示す。実験ケースの一 覧を表5に示す。



表 5 実験ケース一覧表(締固め)

ケース名	水位条件	上層の相対密度 (%)	噴砂発生時間 (分)	噴砂法尻到達時 平均動水勾配	破堤時の平 均動水勾配
case1	1	100	32;30	1.20	1.20
case2	1	70	32;40	0.87	1.20
case3	1	30	32;28	0.70	0.87

1) 噴砂発生時間と漏水流量の経時変化

図 10 に堤内の漏水流量の経時変化及び各ケースの噴砂 発生時間を示す。図 10 より噴砂の発生時間に関しては, 基礎地盤の相対密度を変化させたことによる違いは確認 できなかった。しかし,漏水流量に関しては基礎地盤の相 対密度が大きいほど少なく,小さいほど多いことがわかる。 緩い地盤では密な地盤に比べ,上層の重量は小さいが,漏 水による基礎地盤内の水圧が消散されやすくなっている ため,上層にかかる揚圧力は小さくなる。一方,密な地盤 では上層の重量は大きいが,漏水が抑えられることによっ て,基礎地盤内の水圧が消散されず,上層にかかる揚圧力 は大きくなる。噴砂の発生は被覆土層重量と被覆土層を持 ち上げる揚圧力の比(*G/W*)で表されるが,相対密度を変 化させたことによる*G*の増減が*W*の増減によって相殺さ れたため,噴砂の発生時間に顕著な差が見られなかったと 考えられる。



図 11 締固め度の違いによるパイピング進行挙動の違い



図 12 パイピング進行度定義

2) 噴砂発生後のパイピング進行速度

次に, 噴砂発生後のパイピングの進展度に着目する。 噴 砂発生時間に関しては基礎地盤の相対密度を変化させた ことによる違いは確認できなかったが、パイピング進行度 に関しては大きな変化が確認された(図 11 参照)。パイピ ング進行度の定義は図 12 に示す。いずれのケースも基礎 地盤の行き止まりで噴砂が発生し,その後,法尻方向に噴 砂が移動したが,各ケースで噴砂発生後から噴砂が法尻に 到達する時間は基礎地盤の相対密度が大きくなるほど遅 かった。特に、基礎地盤の相対密度が30%のケースにおい ては,噴砂法尻到達時の平均動水勾配が0.70に対し,100% のケースでは1.20であり、密な基礎地盤の場合、かなり大 きな外力が加わらない限り、パイピングが進展しない。ま た,破堤時の平均動水勾配の値も同様に,基礎地盤の相対 密度が大きくなるほど遅かった。特に、基礎地盤の相対密 度が30%のケースでは他の2ケースと比較して約2/3の外 力で破堤に至った。したがって、緩い基礎地盤の場合は、 密な基礎地盤に比べ噴砂の発生による土粒子の流出速度 が速く、パイピングの進行度もそれに応じて速くなったと 考えられる。

3.6 漏水対策型工法の効果

第1章で述べたように、パイピングに対する伝統的な水防工法として釜段・月の輪工法が用いられているがその効果についてはあまり検討されていない。そこで、模型実験によりその効果性能について検討を行った。

実験模型は図 2 を基本とし,基礎地盤は水中落下法で 堆積させ,上層は硅砂 7 号(低透水層),下層は硅砂 2 号 (透水層)を使用し相対密度が 70%程度になるように締め 固めた。層厚は上層下層それぞれ 45mm ずつである。堤体 部分は含水比 20%の藤森粘土をアクリル壁で囲われた箇 所に入れ締め固めた。なお,堤外側は下層の河床への露出 の有無を変化させた。基礎地盤の下流端は行き止まり構造 となっており,法尻からの距離は 200mm とした。水位条 件は図 8,各材料の粒度分布は図 9 に示す。表 6 に実験 ケースの一覧表を示す。case1 は対策工の効果を模型断面

表 6 実験ケース一覧表(水防工法)

		1	0 人名	~ / /	ار י				
ケーマタ奥行き		き水位冬休	基礎地盤		露出の	水防工法	破堤時の平	林記車百	
/ //u	(mm)	AN BLACT	上層(mm)	下層(mm)	有無	の有無	均動水勾配	10 10 4-32	
ancal	70		硅砂7号	硅砂2号	0	0	0.20	藤孙浩府弐辺(:_0 27時)	
case1	/0	Ŵ	45	45		0	0.50	"真砂述度訂例(1-0.27時)	
case2 250	0	硅砂7号	硅砂2号			0.20	水位60mmを5分間維持		
	250	Ŵ	45	45			0.20	しパイピングに至る	
			硅砂7号	硅砂2号			0.97		
cases 250	230	W	45	45		<u>^</u>	0.87	-	
case4 250	250	0 0	硅砂7号	硅砂2号	0		0	0.20	水位60mmを22分間維持
	250		45	45			0.20	しパイピングに至る	
	250	⁽¹⁾	硅砂7号	硅砂2号	~	~	破堤せず	12 12 1 18 1 18 14 14	
case5	250	250	U U	45	45	×		(1.37)	ハイビングせる





図 13 対策工を模擬した装置(準二次元)

図 14 対策工を模擬した装置 (三次元)

より確認するために模型の奥行きを70mm(準二次元)と し,水位条件についても噴砂の発生など基礎地盤の変状を 細かく確認していくために水位を少しずつ上昇させた(水 位条件②;図7参照)。case2~5は奥行き250mm(三次元) の模型を用いて水位条件①で実験を行った。図13,14に 釜段・月の輪工を模擬した装置を示す。なお,対策工は法 尻で噴砂が発生した際に設置した。

1) 漏水対策型工法による噴砂抑制効果

図 15 に casel における対策工設置前後の PIV による法 尻付近の噴砂速度の計測結果を示す。どちらも平均動水勾 配 *i*=0.27 における計測結果である。対策工設置後は堤体と 対策工間の水位が上昇し,堤内側と約 6.1mm の水位差が 発生したことで噴砂速度が低下した。よって漏水対策型工 法には噴砂速度を低下させ基礎地盤内の土粒子の流出を 抑制する効果がある。また,対策工設置前に着目すると法 尻で噴砂が発生したことで堤体直下の土粒子が流出して いることが分かる。したがって噴砂が法尻で発生した場合 パイピングの進展を助長する恐れがあるため,法尻で発生 した噴砂は優先的に対策工を施す必要がある。

2) 異なる基礎地盤における漏水対策型工法の効果

まず破堤時の平均動水勾配に着目し、case3,5 を比較す る。case3 では平均動水勾配 i=0.87 時にパイピングにより 破堤した。一方対策工を設置した case5 では平均動水勾配 i=1.37 まで水位を上昇させたが破堤に至らなかった。次に 水位の維持時間に着目し、case2,4 を比較する。case2 では、 平均動水勾配 i=0.20 で 5 分間水位を維持した後、パイピン グにより破堤した。一方対策工を設置したケース case4 で は、平均動水勾配 i=0.20 で 22 分間水位を維持した後、パ イピングにより破堤した。また、図 16 に case2,4 のパイピ ング進行度を示す。両ケースともにパイピング進行度が 0.20 に至るまではパイピングの進行速度が同等であるが、



(a) 左図;設置前
 (b) 右図;設置後
 図 15 PIV による対策工設置前後の噴砂速度



図 16 水防工法の有無によるパイピング進行挙動の違い



図 17 噴砂動態・対策工の様子 (case4)

case4 では =3min32sec (実験開始時刻を =0min とする) において月の輪工を設置したことによりパイピング進行 度が一定となった。その後 =10min20sec において月の輪工 が沈下したことでパイピングが進行し始めたが,月の輪工 を再度設置したことで再びパイピング進行度が一定とな った。しかし最終的にパイピング破壊を防ぐことができな かった。よって case4 のように堤内側で多くの漏水・噴砂 の発生が予測される基礎地盤構造である場合,対策工の効 果は一時的なものとなりパイピング破壊を直接的に防ぐ ことができない。したがって漏水対策型工法は基礎地盤構 造によってパイピング破壊を防ぐことができる場合とで きない場合があり,複層かつ透水層が河床への露出を有す るパイピングの危険性が高い基礎地盤構造の場合は事前 に対策が必要である。

3) 対策工設置による噴砂動態の変化

図 17 に case4 における噴砂動態および対策工の様子を 示す。法尻付近における噴砂に対して月の輪工を設置し, 月の輪工内に水位が生じたことで対策工内の噴砂は完全 に停止したが,一方で,行き止まり付近の噴砂は活性化し た(t=3min32sec)。また、堤内全域で噴砂が発生したこと により基礎地盤が液状化状態となり対策工が沈下し噴砂 が再発した(t=10min20sec)。その後漏水が増大し、対策工 が押し流され破堤に至った(t=14min2sec)。よって噴砂を 完全に塞いでしまうと他の箇所で噴砂が発生・活性化する ことが考えられる。また、噴砂単体に対策工を設置しても 噴砂による基礎地盤の液状化に伴い,対策工の外側で別の 噴砂が容易に発生する。以上より噴砂を完全に塞がず, 噴 砂単体に対し対策工を設置するのではなく噴砂箇所を含 む広い範囲に対策を施す必要がある。また、液状化の危険 性が高い基礎地盤構造の場合は対策工が沈下し,効果が十 分に発揮されない可能性がある。

4) 漏水対策型水防工法の効果的な実施方法の提案

噴砂が法尻で発生すると堤体直下の土粒子が流出しパ イピングを助長する可能性がある。また,噴砂を完全に塞 ぐことや,噴砂単体に対策を施すことで他の箇所で噴砂が 活性化する危険性も示された。そこで対策すべき噴砂と範 囲について水防活動の三原則を提案し以下に示す。



図 18 簡易点検フロー

表 7 実堤防の基礎地盤構造の比較

実堤防の被災事例	パイピング進展 危険度	複層	被覆土層厚 (上層の厚)	Lu/Luc	透水係数比 k ₁ /k _u	法尻からの行 き止まり境界 の有無と距離	d / B	河床への透水 層の露出	堤内地の高 低差の有無	堤体
①子吉川右岸 10.8k付近, (噴砂・すべり), 2013	危険度2	0	粘性土+砂質土1m	0.20	100程度	⊖9.6m	0.44	×	0	砂質土
②常呂川左岸 26.8k付近,(噴砂), 2016	危険度3	0	砂質土2m	0.43	100程度	⊖25m	0.93	0	0	粘性土
③矢部川左岸 6.2k付近, (無被災), 2012	危険度1	0	シルト層2m	0.31	100程度	-	-	×	0	粘性土
④矢部川右岸 7.3k付近, (決壞箇所), 2012	危険度3	0	粘性土1m	0.10	100程度	⊖13m	0.77	0	0	粘性土
⑤矢部川右岸 11.8k付近, (漏水・噴砂),2012	危険度1	0	砂質土2.5m	0.60	1000程度	-	-	0	-	砂質土
⑥矢部川左岸 16.0k付近, (漏水・噴砂), 2012	危険度1	0	砂質土2.5m	0.57	100程度	-	-	0	0	砂質土
⑦鬼怒川左岸 13.1k付近,(漏水・噴砂), 2015	危険度低	×	-	-	-	-	-	×	0	砂質土

① 噴砂を堤体に近づけない。(法尻付近の噴砂を優先)

② 噴砂は完全に塞がない。

③ 法尻付近の群生した噴砂は大きく囲う

3.7 点検フローの提案と実際の被災事例との比較

本稿の結果及び現地調査による検討結果を加えた河川 堤防のパイピング破壊に対する簡易な点検フローを図 18 に示す。このフローは堤体の強度が比較的高い条件の下で, まず最重要項目である堤体を支持する基礎地盤構造(層構 造,被覆土層厚,透水係数比,行き止まり距離)について 評価し,その後,堤内・堤外の地形について評価する流れ となっている。また,本稿で検討した項目から現時点で既 知の範囲で子吉川の噴砂・すべり箇所,常呂川の噴砂箇所, 矢部川の決壊箇所,漏水・噴砂箇所,無被災箇所および鬼 怒川の漏水・噴砂箇所のデータを表 7 にまとめ ⁵⁰⁰⁷¹⁸, 簡 易点検フローに従い各箇所ごとに危険度を分類した(図 18 参照)。その結果,被災箇所は無被災箇所に比べ危険度 が高いことが示された。

4. まとめ

層厚による検討からパイピングが進展する可能性があ る被覆土層厚の条件は式(2)より地盤材料と堤体形状で表 せることが分かった。さらに,行き止まりや透水層の露出 の有無,二層の透水係数の比,基礎地盤の締固め度によっ て危険度が大きく変化し,これらは重要な評価項目になる ことが分かった。

また,伝統的漏水対策型水防工法は地盤条件によって水

防効果が発揮される場合とそうでない場合があり,それら を考慮した点検フローを提案した。点検フローを実際の被 災事例と比較し,現地への適用性も確認できた。

謝辞

本研究の成果は、国土交通省・河川砂防技術研究開発制 度平成 29 年度国総研からの委託研究,科学技術研究費(研 究課題 17H03305)の援助を受けたものである。末筆なが ら深謝の意を示します。

参考文献

- 1) 齊藤啓,前田健一,泉典洋:基盤漏水に伴う噴砂及びパイピング 進行条件の検討,河川技術論文集第22巻,pp.251-256,2016.
- 2) 西村柾哉,前田健一,櫛山総平,高辻理人,泉典洋:河川堤防のパイ ピング危険度の力学的簡易点検フローと漏水対策型水防工法 の効果発揮条件,河川技術論文集第24巻, pp.613-618, 2018.
- 高木不折, 辻本哲朗, 鷲見哲也, 井関明子:パイピングによる 破堤課程と「月輪工」の効果の評価, 河川技術に関する論文集, 第5巻, pp.123-128, 1999.
- http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/detailed_inspection_of_see page/detailed_inspection_download.html , 2017.10.20
- 5) 矢部川堤防調査委員会, 矢部川堤防調査委員会報告書, 2013.
- 6) 常呂川堤防調査委員会, 常呂川堤防調査委員会報告書, 2017.
- 7) 鬼怒川堤防調查委員会, 鬼怒川堤防調查委員会報告書, 2017.
- 8) http://www.thr.mlit.go.jp/akita/kasen/koyoshi/index.html. 子吉川水 系河川整備計画